

発明の名称(Title of the invention)

光ファイバ、光伝送路および光ファイバの製造方法
“OPTICAL FIBER, METHOD FOR MANUFACTURING SAME
AND OPTICAL TRANSMISSION CHANNEL”

発明の背景(Background of the invention)

発明の属する技術分野(Field of the invention)

本発明は、光ファイバとその製造方法、および、光伝送路に関するものであり、特に、波長多重伝送技術を用いる長距離大容量伝送システム、無中継海底光ケーブルシステムなどの光通信に使用する光ファイバ、その製造方法、および、波長分割多重（WDM）光伝送に用いる光ファイバおよび光伝送路に関する。

関連技術(Related art)

光通信用シングルモード光ファイバ（SMF）の光伝送信号として使用する波長は1300nm（1.3μm）近傍または1550nm（1.55μm）近傍であることが多いが、波長多重伝送用ファイバでは伝送損失が小さくなる1550nm（1.55μm）の波長が使用されている。

近年、波長多重伝送システムの発展とともに非線形光学効果の抑制、分散の抑制の重要性が高まっている。

このような中で、長距離大容量伝送用ファイバでは、図1に示した、前段部分に有効コア断面積（ A_{eff} ）を拡大した正の波長分散ならびに正の波長分散スロープを有する光ファイバ1を用い、後段部分に負の波長分散ならびに負の波長分散スロープを有する光ファイバ2を用いて両者を組み合わせて、総合的に波長分散を小さくした線路、いわゆる、分散マネージメント型伝送路が提案されている。

また、近海島嶼間の通信などに用いられる無中継海底光ケーブルシステムにおいても非線形光学効果抑制のため、実効（有効）コア断面積 A_{eff} を拡大した光ファイバが用いられている。

これらの波長多重伝送用シングルモード光ファイバの製造方法として、VAD法、OVD法、MCVD法、あるいはこれらを組み合わせて製造する方法などいくつかの公知の合成方法が知られている。

更に、光ファイバを用いて光伝送する際に、伝送容量を増やす方法としてWDM光伝送が注目されている。そのため、WDM光伝送に用いられる光ファイバについても数多くの検討がなされている。

WDM光伝送に使用可能な光ファイバは、1. 3 μ m付近にゼロ分散波長を持つシングルモード光ファイバ(SMF)や、使用波長帯にゼロ分散波長を持たない分散シフト光ファイバ(NZDSF)などが知られている。ところが、上記光ファイバは、例えば、自己位相変調(SPM)や相互位相変調(XPM)といった非線形性の問題を抱えていた。

上記光ファイバについて非線形性の問題を解決するために、分散値を十分ゼロから離して有効コア断面積(A_{eff})を拡大した光ファイバが開発された。有効コア断面積とは、 $(MFD)^2 \times \pi \times k / 4$ の式で示されるもので、ここで k は定数である。例えば、1999年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会予稿集に掲載のC-3-76およびC-3-77には、その例が記載されている。

ところで、前記予稿集に記載された光ファイバは、ともに、分散値が 20 ps/nm/km を超えている。そのため、累積分散が増大して長距離WDM光伝送用には不適当である。

発明の要旨(Summary of the invention)

本発明の第1の態様は、零分散波長が 1250 nm 以上 1350 nm 以下であり、

波長 1550 nm における伝送損失が 0.185 dB/km 以下であり、
波長 1550 nm における波長分散が 19 ± 1 ps/nm · km であり、
波長 1550 nm における波長分散スロープが 0.06 ps/nm² · km 以下であり、

波長 1550 nm における実効コア断面積が $105 \mu\text{m}^2$ 以上であり、
ケーブルカットオフ波長 $\lambda_{c,0}$ が 1530 nm 以下であり、
波長 1550 nm における偏波モード分散が 0.1 ps/km^{1/2} 以下であり、
マンドレル外径 20 mm で曲げたときの波長 1550 nm における曲げ損失が 10 dB/m 以下である

ことを特徴とする光ファイバである。

本発明の第2の態様は、光ファイバの中心に位置し、石英の屈折率 n_0 に対

する比屈折率差が Δn_1 であり、外径が a である第1領域と、

前記第1領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_2 であり外径が b である第2領域と、

前記第2領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_3 であり、外径が c である第3領域と、

前記第3領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_4 であり、外径が d である第4領域と、

前記第4領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_5 であり、外径が e である第5領域とを含み、

前記 Δn_1 乃至 Δn_5 は、

$$\begin{aligned}\Delta n_2 &< \Delta n_4 < \Delta n_3 < \Delta n_1 \\ \Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4 &< 0 \\ \Delta n_5 &> 0\end{aligned}$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバである。

本発明の第3の態様は、第2の態様の光ファイバであって、前記第1領域の外径 a 、前記第2領域の外径 b 、前記第3領域の外径 c は、

$$\begin{aligned}1.20 &\leq b/a \leq 2.00 \\ 1.44 &\leq c/a \leq 4.00\end{aligned}$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバである。

本発明の第4の態様は、第2の態様の光ファイバであって、前記比屈折率差 $\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3$ の値は

$$\begin{aligned}-0.1\% &< \Delta n_1 < 0\% \\ -0.5\% &\leq \Delta n_2 \leq -0.2\% \\ -0.4\% &\leq \Delta n_3 \leq -0.1\%\end{aligned}$$

であることを特徴とする光ファイバである。

本発明の第5の態様は、第2の態様の光ファイバであって前記第5領域の外径 e 、前記第4領域の外径 d は、

$$0.040 \leq \{(e-d)/2\}/e \leq 0.096$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバである。

本発明の第6の態様は、第2の態様の光ファイバであって前記第5領域の外径 e 、前記第4領域の外径 d は、

$$e = 125 \mu m,$$

$$5 \mu m \leq \{(e-d)/2\} \leq 12 \mu m$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバである。

本発明の第7の態様は、光ファイバの中心に位置し、ゲルマニウム濃度が C

G e 1 (m o 1 %)、フッ素濃度がC F 1 (m o 1 %) である第1領域と、
前記第1領域の外周に形成され、ゲルマニウム濃度がC G e 2 (m o 1 %)、
フッ素濃度がC F 2 (m o 1 %) である第2領域と、

前記第2領域の外周に形成され、ゲルマニウム濃度がC G e 3 (m o 1 %)、
フッ素濃度がC F 3 (m o 1 %) である第3領域と、

前記第3領域の外周に形成され、ゲルマニウム濃度がC G e 4 (m o 1 %)、
フッ素濃度がC F 4 (m o 1 %) である第4領域と、

前記第4域の外周に形成されクラッドとを含み、
前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$\begin{aligned} -0.1 &< 0.096 \times C_{G e 1} - 0.398 \times C_{F 1} < 0 \\ -0.5 &\leq 0.096 \times C_{G e 2} - 0.398 \times C_{F 2} \leq -0.2 \\ -0.4 &\leq 0.096 \times C_{G e 3} - 0.398 \times C_{F 3} \leq -0.1 \\ -0.5 &< 0.096 \times C_{G e 4} - 0.398 \times C_{F 4} < -0.1 \end{aligned}$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバである。

本発明の第8の態様は、第7の態様の光ファイバであって、前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$\begin{aligned} C G e 1, C G e 2, C G e 3, C G e 4 &= 0 \\ C F 1, C F 2, C F 3, C F 4 &> 0 \end{aligned}$$

であることを特徴とする光ファイバである。

本発明の第9の態様は、第7の態様の光ファイバであって、前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$\begin{aligned} C G e 1, C F 1 &> 0 \\ C G e 2, C G e 3, C G e 4 &= 0 \\ C F 2, C F 3, C F 4 &> 0 \end{aligned}$$

であることを特徴とする光ファイバである。

本発明の第10の態様は、第7の態様の光ファイバであって、前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$\begin{aligned} C G e 1, C F 1 &> 0 \\ C G e 2 = 0, C F 2 &> 0 \\ C G e 3, C F 3 &> 0 \\ C G e 4 = 0, C F 4 &> 0 \end{aligned}$$

であることを特徴とする光ファイバである。

本発明の第11の態様は、光ファイバの中心に位置し、石英の屈折率n 0
に対する比屈折率差が△ n 1 であり、外径がa である第1領域と、

前記第1領域の外周に形成され、石英の屈折率n 0に対する比屈折率差が
△ n 2 であり外径がb である第2領域と、

前記第2領域の外周に形成され、石英の屈折率n₀に対する比屈折率差が△n₃であり、外径がcである第3領域と、

前記第3領域の外周に形成され、石英の屈折率n₀に対する比屈折率差が△n₄であり、外径がdである第4領域と、

前記第4域の外周に形成され、石英の屈折率がn₀に対する比屈折率差が△n₅であり、外径がeである第5領域とを含み、

前記△n₁乃至△n₅は、

$$\Delta n_2 < \Delta n_4 < \Delta n_3 < \Delta n_1$$

$$\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4 < 0$$

$$\Delta n_5 > 0$$

の関係を有し、

零分散波長が1250nm以上1350nm以下であり、

前記第1領域は、ゲルマニウム濃度がCGe1(mo1%)、フッ素濃度がCF1(mo1%)であり、

前記第2領域は、ゲルマニウム濃度がCGe2(mo1%)、フッ素濃度がCF2(mo1%)であり、

前記第3領域は、ゲルマニウム濃度がCGe3(mo1%)、フッ素濃度がCF3(mo1%)であり、

前記第4領域は、ゲルマニウム濃度がCGe4(mo1%)、フッ素濃度がCF4(mo1%)であり、

前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$-0.1 < 0.096 \times C_{Ge1} - 0.398 \times C_{F1} < 0$$

$$-0.5 \leq 0.096 \times C_{Ge2} - 0.398 \times C_{F2} \leq -0.2$$

$$-0.4 \leq 0.096 \times C_{Ge3} - 0.398 \times C_{F3} \leq -0.1$$

$$-0.5 < 0.096 \times C_{Ge4} - 0.398 \times C_{F4} < -0.1$$

である光ファイバの製造方法であって、

前記第1～第4領域おののの領域となるべきストートを合成する際に、珪素を含むストート合成原材料に所定量のゲルマニウムおよび/またはフッ素を添加して前記ストートを合成し、

該合成されたストートを透明ガラス化する際に、フッ素および/または塩素を含む雰囲気中で焼結させることを特徴とする光ファイバの製造方法である。

本発明の第12の態様は、第11の態様の光ファイバの製造方法であって、前記第1領域となるべき第1ストートを合成し、該第1ストートを加熱してガラス化して第1ガラス体を形成する第1工程と、

前記第2領域となるべき第2ストートを前記第1工程で形成された前記第1ガ

ラス体の外周に合成し、得られた第1ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第1複合ガラス体を形成する第2工程と、

前記第3領域となるべき第3ストートを前記第2工程で形成された前記第1複合ガラス体の外周に合成し、得られた第2ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第2複合ガラス体を形成する第3工程と、

前記第4領域となるべき第4ストートを前記第3工程で形成された前記第2複合ガラス体の外周に合成し、得られた第3ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第3複合ガラス体を形成する第4工程と、

前記第5領域となるべき第5ストートを前記第4工程で形成された前記第3複合ガラス体の外周に合成し、得られた第4ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第4複合ガラス体を形成し該第4複合ガラス体を光ファイバ母材とする第5工程と、

前記光ファイバ母材の一端を加熱して線引して光ファイバを形成する第6工程と

を有することを特徴とする光ファイバの製造方法である。

本発明第13の態様は、波長1550nmにおける分散値の絶対値が4ps/nm/km以上20ps/nm/km以下であり、

波長1550nmにおける分散スロープが0.05ps/nm²/km以上0.08ps/nm²/km以下であり、

波長1550nmにおける伝送損失が0.2dB/km以下であり、

波長1550nmにおける実効コア断面積A_{eff}が80μm²以上であることを特徴とする光ファイバである。

本発明第14の態様は、光ファイバの中心に位置し、シリカの屈折率N0に対する比屈折率差が△1であり、外径がAであるセンターコアと、

前記センターコアの外周に形成され、シリカの屈折率N0に対する比屈折率差が△2であり外径がBであるサイドコアと、

前記サイドコアの外周に形成され、シリカの屈折率N0に対する比屈折率差が△3である第1クラッドと、

前記第1クラッドの外周に形成された第2クラッドとを含み、
前記△1乃至△3は、

$$\Delta 1 > \Delta 2 > \Delta 3$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバである。

本発明の第15の態様は、第14の態様の光ファイバであって、
前記△1乃至△3は、

$$-0.20\% \leq \Delta 1 \leq 0.20\%$$

$$-0.45\% \leq \Delta 2 \leq -0.05\%$$

$-0.50\% \leq \Delta 3 \leq -0.20\%$
の関係を有することを特徴とする光ファイバである。

本発明の第16の態様は、第14の態様の光ファイバであって、
前記センターコアの外径Aと前記サイドコアの外径Bは
 $3 \leq A/B \leq 0.8$
の関係を有し、

前記第2クラッドの粘度は前記センターコアの粘度より高いことを特徴とする光ファイバである。

本発明の第17の態様は、第1の態様又は第2の態様の光ファイバを光伝送路の少なくとも一部に用いたことを特徴とする光伝送路である。

本発明の第18の態様は、第13の態様または第14の態様の光ファイバを光伝送路の少なくとも一部に用いたことを特徴とする光伝送路である。

図面の簡単な説明(Brief description of the drawings)

図1は本発明の光ファイバの適用例としての分散マネージメント光伝送路の構成である。

図2は本発明の第1実施の形態としての光ファイバの構造および屈折率分布を示す図である。

図3(a)から図3(o)は、図2に示した光ファイバの製造方法の1例を示す図である。

図4は本発明の第2実施の形態としての光ファイバの構造および屈折率分布を示す図である。

図5は本発明の第3実施の形態としての光ファイバの構造および屈折率分布を示す図である。

図6は、本発明の光ファイバの屈折率分布構造の一例を示す概略説明図である。

図7は、比較例の屈折率分布を示す概略図である。

図8は、本発明例、比較例の特性一覧表である。

発明の詳細な説明(Detailed description of the invention)

本発明の光ファイバおよびその製造方法の好適実施の形態を添付図面を参照して述べる。

この発明の1つの目的は、零分散波長が1300 nm (1.3 μm) 近傍にある低損失な光ファイバおよびその製造方法を提供することにある。即ち、零分散波長が1300 nm (1.3 μm) 近傍にあり、分散マネージメント光伝送路に適用して好適な伝送特性を有する光ファイバおよびその製造方法を提供

することにある。

第1実施の形態

本発明の光ファイバの1つの実施の形態として、図1に示した分散マネージメント光伝送路の前段の光ファイバ1、すなわち、波長多重伝送用シングルモード光ファイバ1に適用する光ファイバについて例示する。

図1に示した分散マネージメント光伝送路は、前段部分に有効コア断面積 (A_{eff}) を拡大した正の波長分散ならびに正の波長分散スロープを有する波長多重伝送用シングルモード光ファイバ1を用い、後段部分に負の波長分散ならびに負の波長分散スロープを有する光ファイバ2を用いて両者を組み合わせて、総合的に波長分散を小さくすることを意図している。

光ファイバの構成および特性

図2は本発明の光ファイバの第1実施の形態としての有効コア断面積 (A_{eff}) を拡大した正の波長分散ならびに正の波長分散スロープを有する、 $1.3\mu m$ ($1300nm$) 近傍に零分散を持つ、波長多重伝送用シングルモード光ファイバ(SMF) 1の構成および屈折率プロファイルを示した図である。

図2に示した光ファイバは、当該光ファイバの光軸中心に位置する第1領域(A) (または第1コア部または第1光信号伝播領域) 101と、第1領域(A) 101の外周に形成された第2領域(B) (または第2コア部または第2光信号伝播領域) 102と、第2領域(B) 102の外周に形成された第3領域(C) (または第3コア領域または第3光信号伝播領域) 103と、第3領域(C) 103の外周に形成された第4領域(D) (または第4コア部または第4光信号伝播領域) 104と、第4領域(D) 104の外周に形成された第5領域(E) (またはクラッド部または最外層領域) 105とを有する。

最終製品としての光ファイバには、最外層領域105の外周に保護用樹脂が被覆されるが、図示を省略している。

第1領域(A) 101は、直径がa、屈折率n1である。第2領域(B) 102は、外径がb、屈折率n2である。第3領域(C) 103は、外径がc、屈折率n3である。第4領域(D) 104は、外径がd、屈折率n4である。第5領域(E) 105は、外径がe、屈折率n5である。

屈折率を増減させるドーパントがドープされていない、シリカ(珪素)ベースの石英ガラスの屈折率を基準の屈折率n0とする。

基準屈折率n0に対する各屈折率n1～n5との比屈折率差(第1～第5比屈折率差) $\Delta 1 \sim \Delta 5$ は下記式1で規定される。

数 1

$$\Delta n_1 = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_0}{n_1}$$

$$\Delta n_2 = \frac{n_2^2 - n_0^2}{2n_2^2} \approx \frac{n_2 - n_0}{n_2}$$

$$\Delta n_3 = \frac{n_3^2 - n_0^2}{2n_3^2} \approx \frac{n_3 - n_0}{n_3}$$

$$\Delta n_4 = \frac{n_4^2 - n_0^2}{2n_4^2} \approx \frac{n_4 - n_0}{n_4}$$

$$\Delta n_5 = \frac{n_5^2 - n_0^2}{2n_5^2} \approx \frac{n_5 - n_0}{n_5}$$

本発明の第1実施の形態の光ファイバは、下記の光信号伝播層として3層構造の構成要素を持つ。

(1) 光ファイバの中心に位置し、石英の屈折率に対する比屈折率差が0でない負の値 Δn_1 である第1比屈折率差 Δn_1 を持ち、外径が a である第1領域(A) (または第1コア部または第1光信号伝播領域) 101。

(2) 第1領域(A) 101の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差の絶対値が第1比屈折率差 Δn_1 の絶対値よりも大きな負の値 Δn_2 である第2比屈折率差を持ち、外径が b である第2領域(B) (または第2コア部または第2光信号伝播領域) 102。

(3) 第2領域(B) 102の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する

比屈折率差の絶対値が第2比屈折率差 Δn_2 の絶対値よりも小さく、かつ第1比屈折率差 Δn_1 の絶対値よりも大きな負の値 Δn_3 である第3比屈折率差を持ち、外径がcである第3領域(C)（または第3コア部または第3光信号伝播領域）103。

(4) 第3領域(C)103の外周に形成され、石英の屈折率n0に対する比屈折率差の絶対値が第3比屈折率差 Δn_3 の絶対値よりも大きく、かつ、第2比屈折率差 Δn_2 の絶対値よりも小さな負の値 Δn_4 である第4比屈折率差を持ち、外径がdである第4領域(D)（または第4コア部または第4光信号伝播領域）104。

(5) 第4領域(D)104の外周に形成され、石英に対する比屈折率差が0より大きな正の値 Δn_5 である第5比屈折率差を持ち、外径がeである第5領域(E)（または最外層領域またはクラッド部）105。

屈折率の大小関係、および、比屈折率差の関係は下記になる。

$$n_5 > n_0 > n_1 > n_3 > n_4 > n_2$$

$$\begin{aligned} \Delta n_1 &< 0 \\ / \Delta n_2 / &> / \Delta n_1 /, \quad \Delta n_2 < 0 \\ / \Delta n_3 / &< / \Delta n_2 /, \quad / \Delta n_3 / > / \Delta n_1 /, \quad \Delta n_3 < 0 \\ / \Delta n_4 / &> / \Delta n_3 /, \quad / \Delta n_4 / < / \Delta n_2 /, \quad \Delta n_4 < 0 \\ \Delta n_5 &> 0 \end{aligned}$$

伝送特性

本願発明者の考案に基づく、第1実施の形態の1. $3\text{ }\mu\text{m}$ (1300 nm)近傍に零分散を持つ、光ファイバに要求される特性条件(1)を以下に示す。

特性条件(1)

- (1) 伝送損失：波長 1550 nm において 0.185 dB/km 以下
- (2) 波長分散：波長 1550 nm において $1.9 \pm 1\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$
- (3) 波長分散スロープ：波長 1550 nm において $0.06 \pm 0.01\text{ ps/nm}^2\cdot\text{km}$ の範囲
- (4) 実効コア断面積 A_{eff} ：波長 1550 nm において $105\text{ }\mu\text{m}^2$ 以上
- (5) ケーブルカットオフ波長 λ_{oc} ： 1530 nm 以下
- (6) マンドレル外径 20 mm における曲げ損失： 10 dB/m 以下

特性条件(1)に示した特性条件の根拠について述べる。

(a) 本願発明者が、波長多重伝送路を構成する光ファイバについて鋭意実

験し、検討した結果、零分散波長が 1300 nm ($1.3\mu\text{m}$) 近傍にあるシングルモード光ファイバとして好適な光ファイバとして、ケーブルカットオフ波長 λ_{ff} を 1530 nm 以下、かつ、マンドレル外径 20 mm ($20\text{ mm}\phi$) での曲げ損失を 10 dB/m 以下に抑えつつ、実効(有効)コア断面積 A_{eff} を $105\mu\text{m}^2$ 以上とすることで非線形光学効果を抑制した大容量伝送が可能となることが分かった。

(b) さらに、波長 1550 nm における分散を $19 \pm 1\text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ 、かつ、波長 1550 nm における伝送損失を 0.185 dB/km 以下とすることで図1に例示した伝送路全体での平均伝送損失を低減することができる事が分かった。

外径比率

特性条件(2)として、第1領域(A) 101 の外径 a に対する第2領域(B) 102 の外径 b の比率 b/a および第1領域(A) 101 の外径 a に対する第3領域(C) 103 の外径 c の比率 c/a を下記にすることが好ましい。

特性条件(2)

$$1.20 \leq b/a \leq 2.00, \text{ かつ, } 1.44 \leq c/a \leq 4.00$$

外径比率の条件について述べる。外径比率 b/a および c/a をそれぞれ、 2.00 以下、および、 1.44 以上とすることにより、曲げ損失を増加させることなく、実効コア断面積 A_{eff} を大きくすることができる。

さらに、外径比率 b/a を 1.20 以上、かつ、外径比率 c/a を 4.00 以下とすることにより、ケーブルカットオフ波長 λ_{ff} を 1530 nm ($1.53\mu\text{m}$) よりも短くすることができた。

このように、特性条件(2)の不等式を満足するように第1領域(A) 101 の外径 a 、第2領域(B) 102 の内径 b および第3領域(C) 103 の外径 c を設定することにより、伝送容量の大きいシングルモード光ファイバを実現することができた。

比屈折率差

特性条件(3)として、石英の屈折率に対する第1～第4領域 $101 \sim 104$ の屈折率の第1～第4比屈折率差 $\Delta n_1 \sim \Delta n_4$ について述べる。

特性条件(3)

$$\begin{aligned} -0.1\% < \Delta n_1 &< 0\% \\ -0.5\% \leq \Delta n_2 &\leq -0.2\% \end{aligned}$$

$$-0.4\% \leq \Delta n_3 \leq -0.1\% \\ / \Delta n_4 / > / \Delta n_3 /, / \Delta n_4 / < / \Delta n_2 /, \Delta n_4 < 0$$

比屈折率差の条件について述べる。

第1比屈折率差 Δn_1 を -0.1% よりも大きな0でない負の値、第2比屈折率差 Δn_2 を -0.5% 以上、第3比屈折率差 Δn_3 を -0.4% 以上にし、第4比屈折率差 Δn_4 の絶対値を第3比屈折率差 Δn_3 の絶対値よりも大きく、かつ、第2比屈折率差 Δn_2 の絶対値よりも小さな負の値にすると、光ファイバにおける伝送損失の増加を防止しつつ、実効コア断面積 A_{eff} の拡大を図ることができた。

なお、第2比屈折率差 Δn_2 を -0.2% 以下、かつ、第3比屈折率差 Δn_3 を -0.1% 以下にしたのは、 Δn_2 を -0.2% よりも大きくする、あるいは、 Δn_3 を -0.1% よりも大きくするとカットオフ波長が 1550nm ($1.55\mu\text{m}$) よりも長くなるからである。

光ファイバの最外層としてクラッド部（または第5領域（E））105を設けることにより、後述する線引時にコア部が受ける張力を分散させることができる。このため、線引時の張力制御を容易に行うことができる。

シングルモード光ファイバのクラッド部105の外径eは通常、 $125\mu\text{m}$ である。外径dの第4領域（D）104の外周に形成される、クラッド部105の厚さは、クラッド部105の内部に形成される光伝播層の数にも依存する。たとえば、図2に示した光ファイバにおけるクラッド部105の厚さは厚く、図4および図5に示したクラッド部105の厚さは薄くなる。

1例として、第1～第4領域（コア部）101～104およびクラッド部（第5領域）105の外径a～e、および、第1～第5比屈折率差 $\Delta 1$ ～ $\Delta 5$ の例を表1に示す。

表1

	部分	外径	比屈折率差
(1)	第1領域（A）101	$a = 8\mu\text{m}$	$\Delta n_1 = -0.02$
(2)	第2領域（B）102	$b = 10.4\mu\text{m}$	$\Delta n_2 = -0.41$
(3)	第3領域（C）103	$c = 18.7\mu\text{m}$	$\Delta n_3 = -0.25$
(4)	第4領域（D）104	$d = 111\mu\text{m}$	$\Delta n_4 = -0.30$
(5)	第5領域（E）105	$e = 125\mu\text{m}$	$\Delta n_5 = +0.03$

表1に例示した外径比率 b/a および c/a は、 $b/a = 1.3$ 、 $c/a = 2.3375$ である。

またクラッド部105の厚さは、 $(125 - 111) / 2 = 7 \mu\text{m}$ である。

光ファイバの製造条件

表1に例示した比屈折率差 $\Delta n_1 \sim \Delta n_4$ の第1領域(A) 101～第4領域(D) 104を有する光ファイバを形成するため、石英(珪素)を含むスト合成原材料に、屈折率を変化させるドーパント、たとえば、ゲルマニウム、および／または、屈折率を低下させるドーパント、たとえば、フッ素を適宜調整して、シリカベースの材料にドープする(添加する)。

ゲルマニウムは屈折率を増加させるが、上述したように、石英ガラス中に過度にゲルマニウムをドープするとレイリー散乱の問題を起こすので適量ドープすることが望ましい。

また石英ガラス中にフッ素をドープすることにより石英に対する比屈折率差を微調整することができ、所望する伝送特性を実現させる屈折率分布形状を得ることができる。

上述した技術的背景の基に実験した結果、ドーパントの濃度は下記の範囲が望ましい。C_G (mol%) はゲルマニウム濃度を示し、C_F (mol%) はフッ素濃度を示す。

表2

第1領域 (A) 101	$-0.1 < 0.096 \times C_{Ge} - 0.398 \times C_F < 0$
第2領域 (B) 102	$-0.5 \leq 0.096 \times C_{Ge} - 0.398 \times C_F \leq -0.2$
第3領域 (C) 103	$-0.4 \leq 0.096 \times C_{Ge} - 0.398 \times C_F \leq -0.1$
第4領域 (D) 104	$-0.5 \leq 0.096 \times C_{Ge} - 0.398 \times C_F \leq -0.1$

係数0.096は1mol%のゲルマニウムをドープすることにより、比屈折率差が0.096増加し、係数-0.398は1mol%のフッ素をドープすることにより、比屈折率差が0.398減少することを意味している。たとえば、このように、ゲルマニウムおよび／またはフッ素を適宜、ドープして、その結果、第1領域(A) 101の比屈折率差 Δn_1 を-0.1～0未満の範囲にすることを意味している。

上記合成したストートを透明ガラス化する際に少なくともフッ素または塩素を含む雰囲気中で焼結させることが望ましい。特に、第1領域(A)～第4領域(D) 101～104となるべき部分のストートをガラス化する際に塩素を用いることによりストート中に含まれる水分を除去することができ、光ファイバに紡糸された後に問題となる水酸基(OH基)による吸収損失を低減させることができるからである。

第1領域（A）101～第4領域（D）104の全ての領域において珪素を含むストート合成原材料にゲルマニウムをドープ（添加）させないこともできる（ $C_{Ge}=0$ ）。光ファイバの全ての領域において比屈折率差を調整するためのゲルマニウムを含まない石英ガラスとすることは不純物の混入が低減されることを意味する。こうすることによってレイリー散乱を小さくすることができ伝送損失を低減することが可能となる。

あるいは、第1領域（A）101となるべきストートを合成する際にゲルマニウムをストート合成原材料に添加し、第2領域（B）102～第5領域（E）105となるべきストートを合成する際にはストート合成原材料にゲルマニウムを添加しないようにすることもできる。

また、屈折率が高い第1領域（A）101および第3領域（C）103となるべきストートを合成する際に珪素を含むストート合成原材料にゲルマニウムを添加し、屈折率が低い第2領域（B）102および第4領域（D）104、および、クラッド部（最外層領域）105となるべきストートを合成する際には珪素を含むストート合成原材料にゲルマニウムを添加しないようにすることもできる。

本発明の光ファイバの製造方法は、上述したいすれかのドーパント濃度の制御により、光ファイバ径方向の屈折率分布形状の制御性を向上させることができる。

図3（a）～図3（o）を参照して、上記波長多重伝送用シングルモード光ファイバの製造方法の1例を述べる。

第1領域（A）101となる部分（領域）の形成

工程1：図3（a）に示すように、たとえば、VAD法により、バーナー11と出発石英棒12を用いて、後の工程により、ガラス化後に第1領域（A）101となるべきストート（媒体）13を合成する。

工程2：図3（b）に示すように、合成されたストート13を、たとえば、SiF₄を含有する雰囲気中で加熱して透明化したガラス体14とする。次いで、ガラス体14をバーナー15で加熱、延伸して、図3（c）に示すガラス体16に形成する。このガラス体16が、最終的に第1領域（A）101となる。

上記例では、石英の屈折率n0より低い屈折率n1を持つ第1領域（A）101となる部分を形成するため、ドーパントとしてフッ素のみを用いた例を示

すが、たとえば、表5に例示したように、ゲルマニウムとフッ素とをドーパントとして組み合わせることもできる。

第2領域（B）102となる部分（領域）の形成

工程3：図3（d）に示すように、OVD法で、ガラス体16の外周にバーナー17を用いて、後に行なうガラス化処理後に第2領域（B）102となるべきストート18を合成して、ガラス・ストート複合体19を形成する。

工程4：図3（e）に示すように、ガラス・ストート複合体19を、たとえば、 SiF_4 を含有する雰囲気中で加熱して透明化した複合ガラス体20とする。次いで、この複合ガラス体20をバーナー15で加熱、延伸して、図3（f）に示す複合ガラス体21を形成する。

上記例では、石英の屈折率n0より低い屈折率n2を持つ第2領域（B）102となる部分を形成するため、ドーパントとしてフッ素のみを用いた例を示すが、たとえば、表2に例示したように、ゲルマニウムとフッ素とをドーパントとして組み合わせることもできる。

第3領域（C）103となる部分（領域）の形成

工程5：図3（g）に示すように、OVD法で、複合ガラス体21の外周にバーナー17を用いて、後に行なうガラス化処理後に第3領域（C）103となるべきストート22を合成して、ガラス・ストート複合体23を形成する。

工程6：図3（h）に示すように、ガラス・ストート複合体23を、たとえば、 SiF_4 を含有する雰囲気中で加熱して、透明化した複合ガラス体24とし、この複合ガラス体24をバーナー15で加熱、延伸して、図3（i）に示す複合ガラス体25を形成する。

上記例では、石英の屈折率n0より低い屈折率n3を持つ第3領域（C）103となる部分を形成するため、ドーパントとしてフッ素のみを用いた例を示すが、たとえば、表2に例示したように、ゲルマニウムとフッ素とをドーパントとして組み合わせることもできる。

第4領域（D）104となる部分（領域）の形成

工程7：図3（j）に示すように、OVD法で、複合ガラス体25の外周にバーナー17を用いて、後に行なうガラス化処理後に第4領域（D）104となるべきストート26を合成して、ガラス・ストート複合体27を形成する。

工程8：図3（k）に示すように、ガラス・ストート複合体27を、たとえば、 SiF_4 を含有する雰囲気中で加熱して、透明化した複合ガラス体28とし、この複合ガラス体28をバーナー15で加熱、延伸して、図3（l）に示す複

合ガラス体29を形成する。

上記例では、石英の屈折率n0より低い屈折率n4を持つ第4領域(D)104となる部分を形成するため、ドーパントとしてフッ素のみを用いた例を示すが、たとえば、表2に例示したように、ゲルマニウムとフッ素とをドーパントとして組み合わせることもできる。

第5領域(E)105となる部分(領域)の形成

工程9:図3(m)に示すように、OVD法で、複合ガラス体29の外周にバーナー17を用いて、後に行なうガラス化処理後に最外層の第5領域(E)(クラッド部)105となるべきストート30を合成して、ガラス・ストート複合体31を形成する。

工程10:図3(n)に示すように、ガラス・ストート複合体31を加熱して、透明化し、光ファイバ母材(プリフォーム)32を形成する。

最外層領域105の形成には基本的には、ドーパントを添加しない。

光ファイバの形成

工程11:図3(o)に示すように、光ファイバ母材32を線引炉に導入し、線引炉に導入した光ファイバ母材32の下端部をヒーター33を用いて加熱、溶融し、線引炉の外部に引き出して、図2に示す構成を持つシングルモード光ファイバを形成する。

上述した製造方法においては、ストート合成とそのガラス化処理を含めて1工程とすると、合計5工程で、上記複数層のコア部を持つシングルモード光ファイバ母材を製造することができる。

実施例

以下、上述した本発明の第1実施の形態に基づく実施例について述べる。
実施例1

実施例1として、光ファイバの各部分101～104のゲルマニウム濃度C_{Ge}(mo1%)およびフッ素濃度C_F(mo1%)を種々変化させて、上述した製造方法で3種類の試料1～3を作製した。

この場合、ドーパントを含まない石英ガラスの基準屈折率n0に対する光ファイバの各領域101～105の比屈折率差Δn1～Δn5、ならびに、第1領域(A)101の外径aに対する第2領域(B)102の外径との比率b/a、および、第1領域(A)101の外径aに対する第3領域(C)103の外径比率c/aは上述した表1のごとく固定した。すなわち、Δn1=-0.

$\Delta n_2 = -0.41$ 、 $\Delta n_3 = -0.25$ 、 $\Delta n_4 = -0.30$ 、 $\Delta n_5 = +0.03$ であり、 $b/a = 1.30$ 、 $c/a = 2.3375$ である。

試料1～3について、波長1550 nmにおける伝送損失、波長1550 nmにおける波長分散、波長1550 nmにおける波長分散スロープ、波長1550 nmにおける実効コア断面積 A_{eff} 、ケーブルカットオフ波長 λ_{co} 、マンドレル外径20 mm (20 mm ϕ)における曲げ損失などの伝送特性を測定した。測定結果を表3に示す。表3には対比のために上述した所望の特性条件を付記している。

表3

	目標値	試料1 (比較例)	試料2 (本例1)	試料3 (本例2)	
Ge	領域 101, CGe-101 (mol%)	0.03	0.00	0.03	Δn_1
	102, CGe-102	0.39	0.00	0.00	
	103, CGe-103	0.15	0.00	0.00	
	104, CGe-104	0.00	0.00	0.00	
F	領域 101, CF-101 (mol%)	0.06	1.03	0.06	
	102, CF-102	1.12	0.63	1.03	
	103, CF-103	0.66	0.75	0.63	
	104, CF-104	0.75	0.75	0.75	
伝送損失 : dB/km	0.185以下	0.191*	0.178	0.169	$\lambda = 1550\text{nm}$
波長分散 : ps/nm · km	19±1	18.8	19.0	19.4	$\lambda = 1550\text{nm}$
波長分散スローブ : ps/nm ² · km	0.06±0.01	0.0598	0.0592	0.0595	$\lambda = 1550\text{nm}$
A _{eff} : μm^2	105以上	102*	109	107	$\lambda = 1550\text{nm}$
λc : nm	1530以下	1365	1349	1310	
曲げ損失 : dB/m	10以下	7.7	5.6	3.1	20mm ϕ

*表3中 λc を λ_{cc} に変更

評価

試料1は比較例であり、試料2ならびに試料3は本発明の実施例の光ファイ

バに相当する。表3において、*を付したデータが所望の伝送特性を満足していないことを示している。

試料1（比較例）は、第1領域（A）101～第3領域（C）103にゲルマニウムを添加した例であり、波長分散、波長分散スロープ、実効コア断面積 A_{eff} 、ケーブルカットオフ波長 λ_{c} 、曲げ損失は所望する条件を満足するが、伝送損失および A_{eff} が所望の特性を満足していない。比較例において伝送損失が所望する値よりも大きい理由は、光伝送領域中に多くのゲルマニウムが存在することおよびこれに対して石英に対する比屈折率差を低める調整する目的で添加されるフッ素とが不純物として作用することによりレイリー散乱増加による伝送損失の増大が起きているためである。したがって、ゲルマニウムとフッ素の添加量は適切な範囲があることが理解される。

試料2ならびに試料3は、所望する伝送特性をすべて満足している。伝送損失の点で試料3の方が試料2より好ましい結果が得られている。その理由は、試料3について、第1領域（A）101へのゲルマニウムの微量添加（0.03mm² 1%）によって第1領域（A）101と第2領域（B）102の界面近傍でのガラス粘度の整合が促進されて、図3（o）に示す線引時に生じる応力歪の残留が減少し、レイリー散乱による損失が抑制されたことによるものである。したがって、第1領域（A）101には適量のゲルマニウムを添加することが望ましい。

このように、伝送損失以外の伝送特性については石英に対する比屈折率差、ならびに第1領域（A）101、第2領域（B）102および第3領域（C）103の外径の比率を最適化することにより所望とする特性を得ることが可能であるが、伝送損失低減のためには、たとえば、第1領域（A）101についてシリカ（石英）ガラス中のゲルマニウムおよび／またはフッ素のドーパント量をコントロールする必要があることが判明した。

実施例2

実施例2として、第2領域（B）102～第4領域（D）104の比屈折率差 $\Delta n_2 \sim \Delta n_4$ 、ならびに、第1領域（A）101の外径 a に対する第2領域（B）

102の外径比率 b/a 、および、第1領域（A）101の外径 a に対する第3領域（C）103の外径比率 c/a を変化させて3種類の試料A～Cを作製した。

その後、試料A～Cについて、実施例1と同様に、波長1550nmにおける

る伝送損失、波長 1550 nmにおける波長分散、波長 1550 nmにおける波長分散スローブ、波長 1550 nmにおける実効コア断面積 A_{eff} 、ケーブルカットオフ波長 λ_{ce} 、マンドレル外径 20 mm (20 mm ϕ) における曲げ損失などの伝送特性を測定した。測定結果を表 4 に示す。表 4 には対比のために上述した所望の特性条件を付記している。

表 4

項目	目標値	試料A (比較例1)	試料B (比較例2)	試料C (本例)	備考
比屈折率差 (%)	Δn_1	-0.02	-0.02	-0.02	
	Δn_2	-0.55	-0.19	-0.41	
	Δn_3	-0.45	-0.08	-0.25	
	Δn_4	-0.40	-0.15	-0.30	
径比率	b/a	1.40	1.10	1.30	
	c/a	2.38	2.31	2.34	
伝送損失 : dB/km	0.185以下	0.188*	0.175	0.172	$\lambda=1550\text{nm}$
波長分散 : ps/nm·km	19±1	19.4	20.6*	19.8	$\lambda=1550\text{nm}$
波長分散スローフ: ps/nm ² ·km	0.08 ± 0.01	0.0595	0.0603	0.0587	$\lambda=1550\text{nm}$
$A_{\text{eff}} : \mu\text{m}^2$	105以上	101*	119	114	$\lambda=1550\text{nm}$
$\lambda_c : \text{nm}$	1530以下	1310	1750*	1525	
曲げ損失 : dB/m	10以下	3.1	27.3*	8.5	$20\text{mm}\phi$

*表4中 λ_c を λ_{cc} に変更。

試料A、Bは比較例1、2であり、試料Cが本発明の実施例に相当する。表4において、*を付したデータが所望の伝送特性を満足していないことを示している。試料Cは、所望する伝送特性をすべて満足している。

比較例1である試料Aは、比屈折率差 $\Delta n_2 \sim \Delta n_4$ の絶対値が大きく、波長分散、波長分散スロープ、ケーブルカットオフ波長、曲げ損失は所望する条件を満足するが、伝送損失が所望する値よりも大きくなるとともに、 A_{eff} が所望する値よりも小さい。

比較例2である試料Aは、比屈折率差 $\Delta n_2 \sim \Delta n_4$ の絶対値が小さく、外径比率 b/a も小さい。その結果として、伝送損失、波長分散スロープ、 A_{eff} は所望する条件を満足するが、波長分散、カットオフ波長および曲げ損失は所望する条件を満足していない。

以上から、比屈折率差 $\Delta n_2 \sim \Delta n_4$ の絶対値が適切な範囲にあり、少なくとも外径比率 b/a が適切な範囲にあることが所望の特性を満足させるために必要であることが分かる。

他の実施の形態

第1実施の形態およびそれに基づく実施例1および2の比屈折率差 Δn_1 は、コア領域（光伝送領域）が3層構造を有するものについて述べたが、本発明の光ファイバはより複雑な断面形状および屈折率分布形状を用いることを妨げるものではない。以下、上述した諸特性を満足させる、本発明の光ファイバの他の例示的な実施の形態の構成を述べる。

第2実施の形態

図4を参照して本発明の第2実施の形態の光ファイバについて述べる。

図4に示した本発明の第2実施の形態の光ファイバは、図2に示した第1実施の形態の光ファイバに対して、第3領域（C）103と第4領域（D）104aとの間に、外径 f で、第6屈折率 n_6 を持ち、石英の基準屈折率 n_0 に対する第6比屈折率差 Δn_6 を持つ、第1付加領域（または第6光信号伝播領域または第6領域（F））106が付加されている4層構造の光ファイバである。第6比屈折率差 Δn_6 の定義は数式1に準じる。

第1領域（A）101～第3領域（C）103は第1実施の形態の光ファイバの第1領域（A）101～第3領域（C）103と同じである。

最外層領域105の外径は第1実施の形態と同じであり、第1領域（A）101～第3領域（C）103の外径も第1実施の形態と同じと想定した場合、第1付加コア領域106の付加により、第4領域（D）104aの厚さ = $d - f$ は、第1実施の形態の第4領域（D）104の厚さ = $d - c$ より薄くなる。

第4領域（D）104aの比屈折率差 Δn_4 は、その比屈折率差の絶対値が

第6比屈折率差 Δn_6 よりも小さく、かつ、第3比屈折率差 Δn_3 よりも大きな負の値である。第6比屈折率差 Δn_6 は、その比屈折率差の絶対値が第2比屈折率差 Δn_2 よりも小さく、かつ、第3比屈折率差 Δn_3 よりも大きな負の値である。

したがって、屈折率について下記の関係が成立する。

$$n_5 > n_0 > n_1 > n_3 > n_4 > n_6 > n_2$$

図4に示した光ファイバの製造は、図3を参照して述べた、第3領域(C)103の形成の後、第1付加領域(または第6コア領域または第6光信号伝播領域)106の形成工程が付加される。第1付加領域(F)106の形成方法は、第2領域(B)102の形成方法と同様である。ただし、ゲルマニウム濃度およびフッ素濃度が異なる。

第2実施の形態の光ファイバについても上述した所望の特性が課せられ、第2実施の形態の光ファイバもそのような特性を満足する。

第3実施の形態

図5を参照して本発明の第3実施の形態の光ファイバについて述べる。

図5に示した本発明の第3実施の形態の光ファイバは、図4に示した第2実施の形態の光ファイバに対して、第1付加領域(F)106と第4領域(D)104bとの間に、外径gで、第7屈折率n7を持ち、石英の基準屈折率n0に対する第7比屈折率差 Δn_7 を持つ、第2付加領域(または第7光信号伝播領域または第7領域(G))107が付加されている5層構造の光ファイバである。第7比屈折率差 Δn_7 の定義は式1に準じる。

第1領域(A)101～第3領域(C)103は第1および第2実施の形態の光ファイバの第1領域(A)101～第3領域(C)103と同じである。

最外層領域105の外径は第1および第2実施の形態と同じであり、第1領域(A)101～第3領域(C)103の外径も第1および第2実施の形態と同じと想定した場合、第2付加コア領域107の付加により、第4領域(D)104bの厚さ=d-gは、第2実施の形態の第4領域(D)104aの厚さ=d-fより薄くなる。

第4領域(D)104bの比屈折率差 Δn_4 は、その比屈折率差の絶対値が第6比屈折率差 Δn_6 よりも小さく、かつ、第3比屈折率差 Δn_3 よりも大きな負の値である。第6比屈折率差 Δn_6 は、その比屈折率差の絶対値が第2比屈折率差 Δn_2 よりも小さく、かつ、第3比屈折率差 Δn_3 よりも大きな負の値

である。

第7比屈折率差 Δn_7 は、その比屈折率差の絶対値が第3比屈折率差 Δn_3 よりも小さく、かつ、第6比屈折率差 Δn_6 よりも大きな負の値である。したがって、屈折率について下記の関係が成立する。

$$n_5 > n_0 > n_1 > n_3 > n_7 > n_4 > n_6 > n_2$$

図5に図解した光ファイバの製造は、図3を参照して述べた、第3領域(C)103の形成の後、第1付加領域(または第6コア領域または第6光信号伝播領域)106の形成工程が付加され、さらに第2付加領域(または第7コア領域または第7光信号伝播領域)107の形成工程が付加される。

第1付加領域(F)106および第2付加領域(G)107の形成方法は、第2領域(B)102の形成方法と同様である。ただし、ゲルマニウム濃度およびフッ素濃度がそれぞれ異なる。

第3実施の形態の光ファイバについても上述した所望の特性が課せられ、第3実施の形態の光ファイバもそのような特性を満足する。

この発明の他の1つの目的は、分散値を好適なレベルに保持しつつ、 A_{eff} を拡大し、かつ伝送損失を低くした光ファイバを提供することにある。

本発明の光ファイバの他の実施の形態を図面を用いて説明する。図6は、本発明の光ファイバの屈折率分布構造の一例を示す概略説明図である。センタコアN1を中心として、両側にサイドコアN2、その外側には第1クラッドN3、そのさらに外側には第2クラッドN4が配置されている。

センタコアN1は、図示していないが外径寸法aである。また、センタコアN1は、シリカの屈折率の値を指標として示したシリカの屈折率レベルN5に対して最大比屈折率差 $\Delta 1$ を有している。サイドコアN2は、やはり図示していないが外径寸法bであり、同様にシリカの屈折率レベルN5に対して最大比屈折率差 $\Delta 2$ を有している。また、第1クラッドN3は、同様にシリカの屈折率レベルN5に対して最大比屈折率差 $\Delta 3$ を有している。また、第2クラッドN4は、同様にシリカの屈折率レベルN5に対してほぼ同等の屈折率レベルを有している。

ここで、本実施の形態においては、サイドコアN2のシリカの屈折率レベル

N 5に対する比屈折率差 $\Delta 2$ は以下のように定義されるものである。

(1) サイドコア N 2 に屈折率極大点がない場合は、屈折率分布曲線の傾きが最も小さくなる箇所における値とする。

(2) サイドコア N 2 に屈折率極大点がある場合は、屈折率極大点におけるシリカに対する比屈折率差の値（屈折率極大値）とし、屈折率極大値が複数存在する場合はその最大値とする。

なお、サイドコア N 2 に屈折率極大点がある場合には屈折率極小点も存在するが、屈折率極小点の第一クラッドに対する比屈折率差の値（屈折率極小値）の最小値が $\Delta 2$ と $\Delta 3$ との差の 0.5 倍以上の値であるときは、サイドコア N 2 は 1 層で構成されているものとする。

また、センタコア N 1 とサイドコア N 2 との境界は、センタコア N 1 の屈折率分布の曲線を α 曲線で近似した際に、その α 曲線が比屈折率差ゼロの線と交差する点とする。なお、 α 曲線とは、以下の式で表されるものである。

$$\Delta n(r) = \Delta n(0) \times \{1 - (2r/a)^{\alpha}\} \quad \text{--- (式1)}$$

但し、 $0 \leq r \leq a/2$

ここで r は、中心からの距離を示すものである。

a は、センタコアの外径である。

$\Delta n(r)$ は、距離 r での屈折率を示すものである。

$\Delta n(0)$ は、コア中心の屈折率を示すものである。

α は、屈折率分布形状を示すものである。

また、サイドコア N 2 と第 1 クラッド N 3 との境界は、比屈折率差がサイドコア N 2 の第 1 クラッド N 3 に対する比屈折率差 $\Delta 2$ の $1/10$ となる点を通り比屈折率差が変化する方向に伸びる直線が比屈折率差 $\Delta 3$ の線と交差する点とするものである。

上記式 1 を用いてセンターコア屈折率分布を近似することによりサイドコアとの境界が分かる。また、図 8 の表に示したように、 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、第 1 クラッドの (Δ) の値と、前記の a 、及び b 値を用い、計算することにより以下の数値を求めることができる。

分散値は、信号の群分散を示すもので、単位は ($p_s/nm/km$) である。
分散スロープは、群分散の波長での変化率を示すもので、単位は (p_s/nm^2)

$/ \text{km}$) である。 A_{eff} は、光信号の信号の進行方向に垂直な方向での広がりを示すもので、単位は (μm^2) である。伝送損失は光ファイバに線引した後測定される。伝送損失はパワーの減衰を示すもので、単位は (dB/km) である。従って、これらの数値を用いて評価することにより伝送容量を予測することができる。

本実施の形態の光ファイバは内側からセンターコア、サイドコア、第1クラッド、第2クラッドの順に構成されている光ファイバであって、センターコアのシリカに対する比屈折率差を $\Delta 1$ とすると、 $\Delta 1$ が $-0.20\% \sim 0.20\%$ であり、サイドコアのシリカに対する比屈折率差を $\Delta 2$ とすると、 $\Delta 2$ が $-0.45\% \sim -0.05\%$ であり、第1クラッドのシリカに対する比屈折率差を $\Delta 3$ とすると、 $\Delta 3$ が $-0.50\% \sim -0.20\%$ であり、かつ、前記センターコアのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 1$ と、前記サイドコアのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 2$ と、第1クラッドのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 3$ との間に $\Delta 3 < \Delta 2 < \Delta 1$ の関係があり、前記センターコアの外径 a と、前記サイドコアの外径 b との比 a/b が $0.3 \sim 0.8$ であり、第2クラッドはセンターコアより粘度が高く、波長 1550 nm における分散値の絶対値が $4 \text{ ps/nm/km} \sim 20 \text{ ps/nm/km}$ であり、波長 1550 nm における分散スロープが $0.05 \text{ ps/nm}^2/\text{km} \sim 0.08 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ であり、波長 1550 nm における伝送損失が 0.2 dB/km 以下であり、波長 1550 nm における実効コア断面積 A_{eff} が $80 \mu\text{m}^2$ 以上であることを特徴とする。

ここで、センターコアのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 1$ は $-0.20\% \sim 0.20\%$ の範囲とする。前記範囲を上回ると、Ge 等の屈折率を上げるドーパント量を増やさなければならず、伝送損失が大きくなり、下回ると、F 等の Δ を下げるドーパントを増やさなければならず、伝送損失が大きくなる。そのため、本発明では $-0.20\% \sim 0.20\%$ の範囲とする。

サイドコアのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 2$ は $-0.45\% \sim -0.05\%$ の範囲とする。前記範囲を上回ると λ_{cc} 波長が大きくなり、下回ると曲げに弱くなる。そのため、本形態では $-0.45\% \sim -0.05\%$ の範囲とする。

第1クラッドのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 3$ は $-0.50\% \sim -0.20\%$ の範囲とする。この範囲を上回ると曲げに弱くなり、下回ると A_{eff} が小さくなる。そのため、本形態では $-0.50\% \sim -0.20\%$ の範囲とする。

また、前記センターコアのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 1$ と、前記サイドコアのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 2$ と、第1クラッドのシリカに対する比屈折率差 $\Delta 3$ との間には $\Delta 3 < \Delta 2 < \Delta 1$ の関係がある。この関係を保つことによりWDM伝送に適した光ファイバとなる。

また、センターコアの外径 a と、前記サイドコアの外径 b との比 a/b は0.3~0.8である。この範囲を保つことにより A_{eff} を拡大し、曲げロスに強い光ファイバとなる。前記範囲を上回るとカットオフ波長が大きくなり、下回ると A_{eff} が小さくなる。

第2クラッドはセンターコアより粘度が高い。低い場合は、線引後の光ファイバのセンターコアに残留応力が残り、0.2 dB/km以下の伝送素損失を得難くなる。

波長 1550 nmにおける分散値の絶対値は $4 \text{ ps/nm/km} \sim 20 \text{ ps/nm/km}$ である。この範囲を上回ると、累積分散による波形歪みにより伝送速度が制限される。下回ると、4光波混合等の非線形効果が起きやすくなり、伝送速度が制限される。

また、波長 1550 nmにおける分散スロープが $0.05 \text{ ps/nm}^2/\text{km} \sim 0.08 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ である。この範囲を上回ると、DWDM伝送に不適となる。

また、波長 1550 nmにおける伝送損失が 0.2 dB/km以下である。この範囲を上回ると、パワーの減衰が大きいため、ハイパワーを入射しなければならず、非線形効果が大きくなる。

また、波長 1550 nmにおける実効コア断面積 A_{eff} が $80 \mu\text{m}^2$ 以上である。この範囲を下回ると、非線形効果が大きくなる。

本発明の他の形態は、前記の光ファイバを伝送路の少なくとも一部に用いたことを特徴とする。メリットは、従来の伝送路用ファイバに比べて低損失であり、 A_{eff} が拡大されているため、非線形効果が低減できることである。

実施例

(実施例 3～5)

本発明例として、図 6 に示した屈折率分布構造を有する光ファイバについてパラメータを変化させた際の特性の変化を調べた。ここで、パラメーターの内容は Δ_1 であり、用いた式は $\Delta_1 = (n_{s1}^2 - n_s^2) / (2 n_{s1}^2) \times 100$ (%) であり、 n_{s1} はセンタコア 1 の屈折率、 n_s はシリカの屈折率である。なお、センタコアの屈折率分布はステップ形状とし、サイドコアには屈折率極大点がないものとした。

この結果を図 8 としての表 5 に示した。なお、表 5において、 Δ_1 、 Δ_2 、及び第 1 クラッドの値の単位は (%) である。 a/b は、サイドコアの外径に対するセンタコアの外径の比の値である。分散値の単位は ($p_s/nm/km$) である。分散スロープの単位は ($p_s/nm^2/km$) である。伝送損失の単位は (dB/km) である。 A_{eff} の単位は (μm^2) である。また、参考としてカットオフ波長 λ_c (単位は nm) を示した。

(比較例)

比較例として、図 7 に示した屈折率分布構造を有する光ファイバについて、 $\Delta_1 = (n_{s1}^2 - n_s^2) / (2 n_{s1}^2) \times 100$ (%) (ここで、 n_{s1} はコア 3 1 の屈折率、 n_s はシリカの屈折率) の特性を調べた。この結果を図 8 としての表 5 に併せて示した。

表 5 に示したように、実施例 3～5 の光ファイバは、屈折率分布を最適化したために、WDM 光伝送に適した特性を有している。ところが、比較例の光ファイバは Δ が低いために分散値が、また Δ が低いためにカットオフ波長が、WDM 光伝送に適さないものとなっている。

次に、実施例 3 の光ファイバと、その分散をほぼ完全に補償できる長さの線路型分散補償光ファイバとを用いて光伝送路を構成した。また、実施例 4、実施例 5、比較例の光ファイバについても、同様の光伝送路を構成した。ここで、WDM 光信号の条件は 10 Gbps 16 波を波長 1530～1560 nm の範囲で等間隔に配置し、実施例 3～5、および比較例の光ファイバの長さを 10 km としたときの伝送実験の結果を、図 8 の表 5 に合わせて示した。

表 5 に示したように、実施例 3～5 の光ファイバを用いた光伝送路は、WDM 光伝送に適した特性を有するが、比較例の光ファイバを用いた光伝送路は、WDM 光伝送に適さないものとなっている。なお、本発明の光伝送路は、上述

のものに限らず、様々な実施形態をとることができる。例えば、線路型分散補償光ファイバのかわりに分散補償光ファイバモジュールなどを用いて光伝送路を構成してもよい。

本発明によれば、零分散波長が 1300 nm ($1.3\mu\text{m}$) 近傍にある、優れた伝送特性を有する光ファイバを得ることができる。このような光ファイバは波長多重伝送用シングルモード光ファイバとして好適に適用できる。

また本発明によれば、上記光ファイバを安定して製造できる。

さらに本発明によれば、線引時の張力制御が容易になる。

更に、本発明によれば、WDM光伝送に適した光ファイバおよび光伝送路を実現することが可能である。

特許請求の範囲(What is claimed is:)

1. 零分散波長が 1 250 nm 以上 1 350 nm 以下であり、
波長 1 550 nm における伝送損失が 0. 185 dB/km 以下であり、
波長 1 550 nm における波長分散が $19 \pm 1 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ であり、
波長 1 550 nm における波長分散スロープが $0. 06 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$ 以下であり、
波長 1 550 nm における実効コア断面積が $105 \mu\text{m}^2$ 以上であり、
ケーブルカットオフ波長 $\lambda_{c,c}$ が 1 530 nm 以下であり、
波長 1 550 nm における偏波モード分散が $0. 1 \text{ ps/km}^{1/2}$ 以下であり、
マンドレル外径 20 mm で曲げたときの波長 1 550 nm における曲げ損失
が 10 dB/m 以下である
ことを特徴とする、光ファイバ。
2. 光ファイバの中心に位置し、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_1 であり、外径が a である第 1 領域と、
前記第 1 領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_2 であり外径が b である第 2 領域と、
前記第 2 領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_3 であり、外径が c である第 3 領域と、
前記第 3 領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_4 であり、外径が d である第 4 領域と、
前記第 4 領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_5 であり、外径が e である第 5 領域とを含み、
前記 Δn_1 乃至 Δn_5 は、
$$\Delta n_2 < \Delta n_4 < \Delta n_3 < \Delta n_1$$
$$\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4 < 0$$
$$\Delta n_5 > 0$$
の関係を有することを特徴とする光ファイバ。
3. クレーム 2 記載の光ファイバであって、前記第 1 領域の外径 a 、前記第 2 領域の外径 b 、前記第 3 領域の外径 c は、
 1. $2.0 \leq b/a \leq 2.00$
 1. $4.4 \leq c/a \leq 4.00$の関係を有することを特徴とする光ファイバ。
4. クレーム 2 に記載の光ファイバであって、前記比屈折率差 Δn_1 、 Δn_2 、 Δn_3 の値は
$$-0.1\% < \Delta n_1 < 0\%$$

$$-0.5\% \leq \Delta n_2 \leq -0.2\%$$

$$-0.4\% \leq \Delta n_3 \leq -0.1\%$$

であることを特徴とする光ファイバ。

5. クレーム2に記載の光ファイバであって
前記第5領域の外径e、前記第4領域の外径dは、

$$0.040 \leq \{(e-d)/2\}/e \leq 0.096$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバ。

6. クレーム2に記載の光ファイバであって
前記第5領域の外径e、前記第4領域の外径dは、

$$e = 125 \mu m,$$

$$5 \mu m \leq \{(e-d)/2\} \leq 12 \mu m$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバ。

7. 光ファイバの中心に位置し、ゲルマニウム濃度がCGe1 (mo 1%)、
フッ素濃度がCF1 (mo 1%) である第1領域と、

前記第1領域の外周に形成され、ゲルマニウム濃度がCGe2 (mo 1%)、
フッ素濃度がCF2 (mo 1%) である第2領域と、

前記第2領域の外周に形成され、ゲルマニウム濃度がCGe3 (mo 1%)、
フッ素濃度がCF3 (mo 1%) である第3領域と、

前記第3領域の外周に形成され、ゲルマニウム濃度がCGe4 (mo 1%)、
フッ素濃度がCF4 (mo 1%) である第4領域と、

前記第4域の外周に形成されクラッドとを含み、
前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$-0.1 < 0.096 \times C_{Ge1} - 0.398 \times C_{F1} < 0$$

$$-0.5 \leq 0.096 \times C_{Ge2} - 0.398 \times C_{F2} \leq -0.2$$

$$-0.4 \leq 0.096 \times C_{Ge3} - 0.398 \times C_{F3} \leq -0.1$$

$$-0.5 < 0.096 \times C_{Ge4} - 0.398 \times C_{F4} < -0.1$$

の関係を有することを特徴とする光ファイバ。

8. クレーム7に記載の光ファイバであって、前記ゲルマニウム濃度、フッ
素濃度は、

$$CGe1, CGe2, CGe3, CGe4 = 0$$

$$CF1, CF2, CF3, CF4 > 0$$

であることを特徴とする光ファイバ。

9. クレーム7に記載の光ファイバであって、前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$CGe\ 1, CF\ 1 > 0$$

$$CGe\ 2, CGe\ 3, CGe\ 4 = 0$$

$$CF\ 2, CF\ 3, CF\ 4 > 0$$

であることを特徴とする光ファイバ。

10. クレーム7に記載の光ファイバであって、前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$CGe\ 1, CF\ 1 > 0$$

$$CGe\ 2 = 0, CF\ 2 > 0$$

$$CGe\ 3, CF\ 3 > 0$$

$$CGe\ 4 = 0, CF\ 4 > 0$$

であることを特徴とする光ファイバ。

11. 光ファイバの中心に位置し、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_1 であり、外径が a である第1領域と、

前記第1領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_2 であり外径が b である第2領域と、

前記第2領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_3 であり、外径が c である第3領域と、

前記第3領域の外周に形成され、石英の屈折率 n_0 に対する比屈折率差が Δn_4 であり、外径が d である第4領域と、

前記第4域の外周に形成され、石英の屈折率が n_0 に対する比屈折率差が Δn_5 であり、外径が e である第5領域とを含み、

前記 Δn_1 乃至 Δn_5 は、

$$\Delta n_2 < \Delta n_4 < \Delta n_3 < \Delta n_1$$

$$\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4 < 0$$

$$\Delta n_5 > 0$$

の関係を有し、

零分散波長が1250nm以上1350nm以下であり、

前記第1領域は、ゲルマニウム濃度が $CGe\ 1$ ($m\ o 1\%$)、フッ素濃度が $CF\ 1$ ($m\ o 1\%$) であり、

前記第2領域は、ゲルマニウム濃度が $CGe\ 2$ ($m\ o 1\%$)、フッ素濃度が $CF\ 2$ ($m\ o 1\%$) であり、

前記第3領域は、ゲルマニウム濃度がCGe3 (m o 1%)、フッ素濃度がCF3 (m o 1%) であり、

前記第4領域は、ゲルマニウム濃度がCGe4 (m o 1%)、フッ素濃度がCF4 (m o 1%) であり、

前記ゲルマニウム濃度、フッ素濃度は、

$$-0.1 < 0.096 \times C_{Ge1} - 0.398 \times C_{F1} < 0$$

$$-0.5 \leq 0.096 \times C_{Ge2} - 0.398 \times C_{F2} \leq -0.2$$

$$-0.4 \leq 0.096 \times C_{Ge3} - 0.398 \times C_{F3} \leq -0.1$$

$$-0.5 < 0.096 \times C_{Ge4} - 0.398 \times C_{F4} < -0.1$$

である光ファイバの製造方法であって、

前記第1～第4領域おののおのの領域となるべきストートを合成する際に、珪素を含むストート合成原材料に所定量のゲルマニウムおよび／またはフッ素を添加して前記ストートを合成し、

該合成されたストートを透明ガラス化する際に、フッ素および／または塩素を含む雰囲気中で焼結させることを特徴とする光ファイバの製造方法。

12. クレーム11に記載の光ファイバの製造方法であって、

前記第1領域となるべき第1ストートを合成し、該第1ストートを加熱してガラス化して第1ガラス体を形成する第1工程と、

前記第2領域となるべき第2ストートを前記第1工程で形成された前記第1ガラス体の外周に合成し、得られた第1ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第1複合ガラス体を形成する第2工程と、

前記第3領域となるべき第3ストートを前記第2工程で形成された前記第1複合ガラス体の外周に合成し、得られた第2ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第2複合ガラス体を形成する第3工程と、

前記第4領域となるべき第4ストートを前記第3工程で形成された前記第2複合ガラス体の外周に合成し、得られた第3ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第3複合ガラス体を形成する第4工程と、

前記第5領域となるべき第5ストートを前記第4工程で形成された前記第3複合ガラス体の外周に合成し、得られた第4ガラス・ストート複合体を加熱してガラス化して第4複合ガラス体を形成し該第4複合ガラス体を光ファイバ母材とする第5工程と、

前記光ファイバ母材の一端を加熱して線引して光ファイバを形成する第6工程と

を有することを特徴とする、光ファイバの製造方法。

13. 波長1550nmにおける分散値の絶対値が4ps/nm/km以上20ps/nm/km以下であり、
波長1550nmにおける分散スロープが0.05ps/nm²/km以上0.08ps/nm²/km以下であり、
波長1550nmにおける伝送損失が0.2dB/km以下であり、
波長1550nmにおける実効コア断面積A_{eff}が80μm²以上であることを特徴とする光ファイバ。

14. 光ファイバの中心に位置し、シリカの屈折率N₀に対する比屈折率差が△1であり、外径がAであるセンターコアと、
前記センターコアの外周に形成され、シリカの屈折率N₀に対する比屈折率差が△2であり外径がBであるサイドコアと、
前記サイドコアの外周に形成され、シリカの屈折率N₀に対する比屈折率差が△3である第1クラッドと、
前記第1クラッドの外周に形成された第2クラッドとを含み、
前記△1乃至△3は、
 $\Delta 1 > \Delta 2 > \Delta 3$
の関係を有することを特徴とする光ファイバ。

15. クレーム14に記載の光ファイバであって、
前記△1乃至△3は、
-0.20%≤△1≤0.20%
-0.45%≤△2≤-0.05%
-0.50%≤△3≤-0.20%
の関係を有することを特徴とする光ファイバ。

16. クレーム14に記載の光ファイバであって、
前記センターコアの外径Aと前記サイドコアの外径Bは
 $3 \leq A/B \leq 0.8$
の関係を有し、
前記第2クラッドの粘度は前記センターコアの粘度より高いことを特徴とする光ファイバ。

17. クレーム1又は2に記載の光ファイバを光伝送路の少なくとも一部に用いたことを特徴とする光伝送路。

18. クレーム13又は14に記載の光ファイバを光伝送路の少なくとも一部に用いたことを特徴とする光伝送路。

要約 (Abstract)

零分散波長が1250 nm以上1350 nm以下であり、波長1550 nmにおける伝送損失が0.185 dB/km以下であり、波長1550 nmにおける波長分散が $19 \pm 1 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ であり、波長1550 nmにおける波長分散スロープが $0.006 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$ 以下であり、実効コア断面積が $105 \mu\text{m}^2$ 以上であり、ケーブルカットオフ波長 λ_c が1530 nm以下であり、偏向モード分散が $0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$ 以下であり、マンドレル外径20 mmで曲げたときの曲げ損失が10 dB/m以下であることを特徴とする光ファイバ。